

Elementos traza y nutrientes en plantas y suelos afectados por el vertido minero de Aznalcóllar

P. Madejón Rodríguez

Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, CSIC, Apartado 1052, E-41080 Sevilla, España

Se denominan 'elementos traza' a aquellos elementos químicos que tienen una concentración baja en las plantas (inferior al 0,1 %), independientemente de que sean esenciales para su metabolismo o tengan efectos tóxicos. Los elementos traza, como el arsénico (As), cadmio (Cd) o talio (Tl), son poco abundantes en el agua y el suelo, en condiciones naturales. Sin embargo, las actividades industriales y mineras pueden originar una contaminación por estos elementos, que pasarían a las plantas y animales donde se pueden concentrar y causar efectos tóxicos.

La madrugada del 25 de abril de 1998, el dique de contención de una balsa de decantación de la mina de los Frailes, en Aznalcóllar (Sevilla), se desplazó unos 60 m, liberándose una mezcla de lodos y aguas ácidas (unos 5 millones de m³) que inundó parte de las cuencas de los ríos Agrio y Guadiamar (**Fig. 1**). La contaminación se extendió a lo largo de 60 km, entre la balsa minera y las marismas del Guadalquivir, en el límite del Parque Nacional de Doñana (véase una revisión del accidente y su impacto ambiental en el número monográfico de la revista *Science of Total Environment*, Grimalt y Macpherson, 1999).



Figura 1. Zona afectada por el vertido minero en la Cuenca del Río Guadamar, con la localización de los principales puntos de seguimiento de las plantas. Mapa modificado de la Consejería de Medio Ambiente, 2001.

Tras el accidente, se procedió a retirar de forma inmediata la capa de lodos, junto con los primeros 10-20 cm de suelo contaminado subyacente. A pesar de estas labores de limpieza y de adición de enmiendas, se ha seguido detectando un cierto nivel de contaminación residual, incluso en las zonas más 'limpias' (Cabrera *et al.*, 2004). La toxicidad de ciertos elementos traza (como el plomo, el cadmio, el arsénico y el talio) que formaban parte de los residuos mineros y podrían afectar a plantas y animales, impulsó que la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía organizara un programa de investigación coordinado, conocido como PICOVER (Plan de Investigación del Corredor Verde, CMA 2003).

Esta Tesis Doctoral, que ha formado parte del PICOVER, se ha centrado en el seguimiento de la bioacumulación de elementos traza en plantas de la Cuenca del Río Guadiamar, durante los años 1999 a 2001. Se han seleccionado cinco especies de plantas como diferentes modelos para investigar estos procesos bio-geo-químicos: el álamo blanco (*Populus alba* L.) es una especie abundante en el bosque de ribera del Guadiamar (**Fig. 2**); la encina (*Quercus rotundifolia* Lam.) y el acebuche (*Olea europaea* L.) son especies representativas del bosque mediterráneo y todavía persisten en algunos retazos de dehesa, en terrazas del Guadiamar; la grama (*Cynodon dactylon* (L.) Pers. variedad *affinis* (Caro y Sánchez) Romero-Zarco) es una gramínea muy abundante y que ha colonizado los antiguos cultivos, que han sido transformados en plantaciones forestales después del accidente; por último se ha incluido el girasol (*Helianthus annuus* L.), una especie cultivada que se ha ensayado para la fitorremediación.



Figura 2. Bosque de ribera con álamo blanco en el Río Guadiamar a su paso por Azanalcázar (Autor: T. Marañón).

Las hojas de los árboles se han utilizado con frecuencia para la 'biomonitorización' de la contaminación por elementos traza en el medio ambiente. Esta aplicación se basa en la capacidad de las plantas para acumular los elementos minerales en sus órganos. Sin embargo, los patrones de bioacumulación son muy variables, tanto entre especies vegetales como entre los diferentes elementos minerales, y no siempre existe una relación extrapolable. En los bosques de ribera del Guadiamar se ha encontrado una correlación positiva y significativa entre las concentraciones de cadmio y cinc en las hojas de los álamos, respecto a su disponibilidad potencial (concentración extraída con EDTA) en el suelo (**Fig. 3**). La concentración de cadmio en hojas es más del doble que su disponibilidad en suelo; alcanzando valores puntuales cercanos a 20 mg kg^{-1} que están comprendidos en el intervalo fitotóxico ($5 ? 700 \text{ mg kg}^{-1}$). Por otra parte, la concentración de cinc en hojas es más del triple que su disponibilidad en el suelo y también alcanza valores extremos del orden de 1300 mg kg^{-1} , que también estarían dentro del intervalo de fitotoxicidad ($500 ? 1500 \text{ mg kg}^{-1}$). En este caso se ha comprobado que el álamo blanco, al igual que otras especies de la familia salicácea, acumula Cd y Zn en sus hojas, que por tanto pueden ser utilizadas para biomonitorizar los niveles de contaminación de estos dos metales pesados en la cuenca del Guadiamar (Madejón, 2003; Madejón *et al.*, 2004b).

En las hojas de encinas y acebuches también se acumularon cantidades apreciables de elementos traza; sin embargo, en los frutos y en especial en las semillas la bioacumulación fue bastante menor. Así, en las semillas (interior de las bellotas) de las encinas, las concentraciones medias fueron de $0,03 \text{ mg kg}^{-1}$ de As, $0,09 \text{ mg kg}^{-1}$ de Pb y $0,01 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd frente a los valores mucho más altos en hojas; promedios de $0,92 \text{ mg kg}^{-1}$ de As, $3,42 \text{ mg kg}^{-1}$ de Pb y $0,09 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd. Por otro lado, en la pulpa de los frutos de acebuche (las acebuchinas), las concentraciones medias fueron relativamente altas: $0,13 \text{ mg kg}^{-1}$ de As, $0,30 \text{ mg kg}^{-1}$ de Pb y $0,03$ de Cd, pero no tanto como en las hojas; promedios de $0,35 \text{ mg kg}^{-1}$ de As, $1,0 \text{ mg kg}^{-1}$ de Pb y $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd. Estos valores indican una menor translocación interna de los elementos traza hacia las estructuras reproductoras. Como consecuencia para la red trófica, los consumidores de frutos y semillas se verán menos afectados por la contaminación que los defoliadores y ramoneadores (Madejón *et al.*, 2004a).

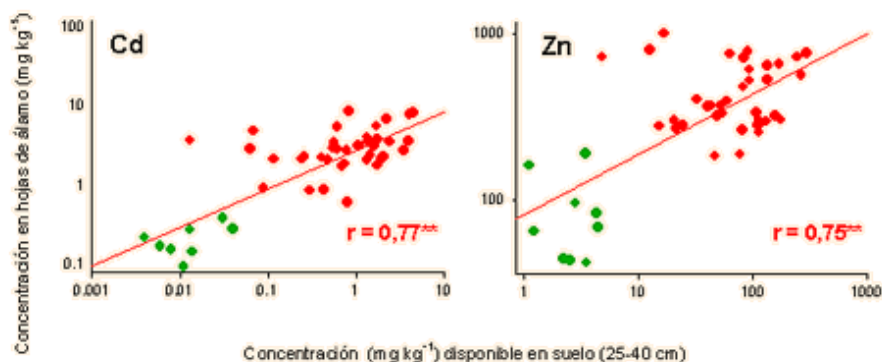


Figura 3. Correlaciones entre la concentración de Cd y Zn en el suelo (valores disponibles después de la extracción con EDTA) y en las hojas de álamo. En ambos casos se ha usado escala logarítmica. Se distinguen los árboles no afectados por el vertido (·) de los que están en la zona afectada (·). Se indica el valor del coeficiente de correlación y su significación (** $p < 0,01$).

El seguimiento de la concentración de elementos traza en la parte aérea de la grama, una planta muy extendida por la Cuenca del Guadiamar y bastante apetecible para los herbívoros, ha permitido evaluar los efectos de la retirada de los lodos y posterior remediación de los suelos (**Fig. 4**). Partiendo de una situación de concentraciones bajas de As y Cd antes del accidente (equivalente a la que se encuentra actualmente en las zonas no afectadas), los niveles se multiplicaron por 450 en el caso del As y por 75 en el caso del Cd para las plantas que estaban creciendo directamente sobre los lodos. La limpieza de los suelos redujo de una forma drástica las concentraciones de As en las plantas de grama que los colonizaron, alcanzando niveles inferiores a los considerados tóxicos para el ganado. Sin embargo, en el caso del cadmio, aunque la reducción también ha sido muy importante, los niveles de contaminación en planta (al menos en la grama) están por encima de los umbrales de toxicidad y debe continuarse y ampliarse el seguimiento de la bioacumulación de este elemento traza (Madejón *et al.*, 2002).

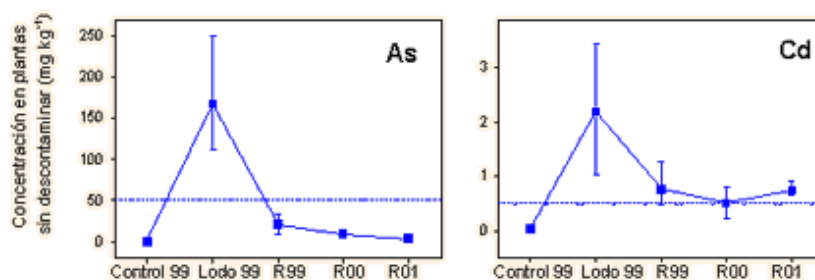


Figura 4. Concentraciones de As y Cd en tejidos (hojas y tallos) de grama recolectada en cinco situaciones diferentes: suelo control en el año 1999 (Control 99), suelo cubierto por lodos en el año 1999 (Lodo 99) y suelo contaminado después de haber sido limpiado y remediado con enmiendas en los años 1999 (R99), 2000 (R00) y 2001 (R01). Se indica la media y el intervalo entre los valores máximos y mínimos ($n = 3$). Con una línea punteada se indica el umbral tóxico para el consumo por el ganado, según Chaney (1989, ver Madejón *et al.*, 2002).

Un ensayo de fitorremediación con girasol realizado (en colaboración con M. A. Soriano, de la Universidad de Córdoba) en los suelos afectados por el vertido minero, ha permitido llevar a cabo el análisis de crecimiento y de distribución de recursos a nivel de planta completa, con esta especie. La producción final (peso seco total de la planta) en la zona afectada no fue diferente de la zona control, sin embargo los patrones de crecimiento y de acumulación de elementos minerales fueron diferentes (Madejón *et al.* 2003). La 'alocación' de nutrientes relativa a la biomasa, fue mayor en las estructuras reproductoras de las plantas afectadas por el vertido que en las de las no afectadas. Por el contrario, los elementos más tóxicos (As, Cd, Pb y Tl), se acumularon preferentemente en la raíz. Ante la situación de estrés

ocasionada por la concentración elevada de elementos traza en el suelo, las plantas afectadas realizaron una mayor 'inversión' de recursos (biomasa y nutrientes minerales) en las estructuras reproductoras, en comparación con las no afectadas. Las tasas de utilización específica (SUR) calculadas para N y P fueron mayores en las plantas afectadas por el vertido, mientras que para los elementos traza (Zn y Cd) fueron menores. Es decir, el estrés del suelo contaminado indujo que por cada gramo de N o P en hoja se produjera mayor biomasa en la fase reproductora; mientras que por cada gramo de Zn o Cd (acumulados en exceso) se produjera menor biomasa. Los elementos traza deben estar debidamente compartimentados en la hoja y/o retenidos en la raíz, para que no interfieran en el crecimiento y normal funcionamiento de la planta.

PAULA MADEJÓN RODRÍGUEZ

Elementos traza y nutrientes en plantas y suelos afectados por el vertido minero de Aznalcóllar.

Tesis Doctoral.

Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, CSIC.

Marzo de 2004.

Dirección: J.M. Murrillo y T. Marañón.

Referencias

Cabrera F., Clemente L., Cordon R., Hurtado M. D., López R., Madejón P., Marañón T., Moreno F., Murrillo J. M. y Nagel I. 2004. Heavy metals pollution in soils of the Guadiamar river valley. En: Del Valls, T. A. y Blasco, J. (eds). *Integrated Assessment and Management of the Ecosystems Affected by the Aznalcollar Mining Spill (SW, Spain)*. UNESCO, París (en prensa).

CMA 2003. *Ciencia y restauración del Río Guadiamar. Resultados del Programa de Investigación del Corredor Verde del Guadiamar 1998-2002*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Sevilla.

Grimalt J. O. y Macpherson E. (eds) 1999. The Environmental impact of the mine tailing accident in Aznalcóllar (Volumen especial). *The Science of the Total Environment* 242: 1-337.

Madejón P. 2003. Elementos traza y nutrientes en álamo blanco tras el vertido tóxico de las minas de Aznalcóllar. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales* 12 (3): 19-32.

Madejón P., Marañón T., Murrillo J. M. y Cabrera F. 2004a. Evolution of arsenic, lead, iron and manganese in evergreen trees affected by the Aznalcóllar mine spill. En: Del Valls, T. A. y Blasco, J. (eds). *Integrated Assessment and Management of the Ecosystems Affected by the Aznalcollar Mining Spill (SW, Spain)*. UNESCO, París (en prensa).

Madejón P., Marañón T., Murrillo J. M. y Robinson B. 2004b. White poplar (*Populus alba*) as a biomonitor of trace elements in contaminated riparian forests. *Environmental Pollution* (en prensa).

Madejón P., Murrillo J. M., Marañón T., Cabrera F. y López R. 2002. Bioaccumulation of As, Cd, Cu, Fe and Pb in wild grasses affected by the Aznalcóllar mine spill (SW Spain). *The Science of the Total Environment* 290: 105-120.

Madejón P., Murrillo J. M., Marañón T., Cabrera F. y Soriano M.A. 2003. Trace element and nutrient accumulation in sunflower plants two years after the Aznalcóllar mine spill. *The Science of the Total Environment* 307: 239-257.